

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТИ В ЗАКАЛЕННЫХ И СОСТАРЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА CoNiAl

Канафьева А.С., Ефтифеева А.С.

*Руководители – доцент, к.ф.-м.н. Панченко Е.Ю., профессор, д.ф.-м.н.,
Чумляков Ю.И.*

Национально исследовательский Томский государственный
университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36
e - mail: snowflake_nutik@mail.ru

Поли- и монокристаллы CoNiAl, испытывающие B2-L1₀ термоупругие мартенситные превращения (МП) в ферромагнитном состоянии, обладают высокой коррозионной стойкостью и способны испытывать обратимые деформации под действием температуры, механических напряжений и магнитных полей. В настоящее время для использования в автомобильной и космической промышленности, ведется интенсивный поиск высокотемпературных сплавов с термоупругими МП, которые испытывают обратимые деформации при $T > 373$ К и обладают высокой циклической стабильностью функциональных свойств – эффекта памяти формы и сверхэластичности (СЭ). Известно, [2] что выделение когерентных частиц в сплавах с термоупругим МП может приводить к значительному упрочнению аустенита за счет эффектов дисперсионного твердения и расширению температурного интервала сверхэластичности. При старении монокристаллов CoNiAl в интервале температур $673 \div 873$ К выделяются дисперсные частицы: равноосные частицы α -Co с ГЦК решеткой, неравноосные частицы ϵ -Co с ГПУ решеткой и со сверхструктурой типа Ni₂Al [1, 2, 3]. Однако, до сих пор систематического исследования влияния старения на высокотемпературную СЭ в монокристаллах CoNiAl не проводилось. Поэтому целью данной работы было исследовать ориентационную зависимость СЭ в закаленных и состаренных монокристаллах Co₃₅Ni₃₅Al₃₀, ориентированных вдоль [001] и [011]-направлений. Монокристаллы выращивали по методу Бриджмена в атмосфере инертного газа. Образцы для испытаний имели форму параллелепипеда размером $3 \times 3 \times 6$ мм³. Изначально образцы отжигали в течение 8,5 ч. при 1613 К и закаливали в воду. Старение проводили в вакууме при 673 К, 30 мин. Температуры МП в закаленном состоянии были определены по зависимости электросопротивления от температуры где $M_s = (255 \pm 2)$ К $M_f = (181 \pm 2)$ К $A_s = (208 \pm 2)$ К $A_f = (141 \pm 2)$ К. Экспериментально показано, что в закаленном состоянии в монокристаллах CoNiAl при деформации сжатием, наблюдается сильная

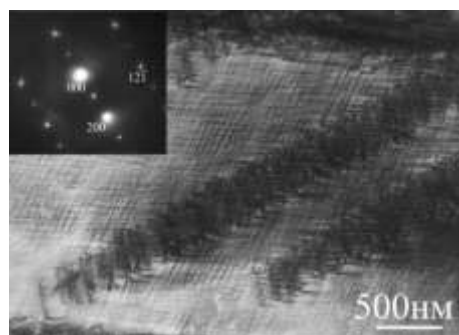
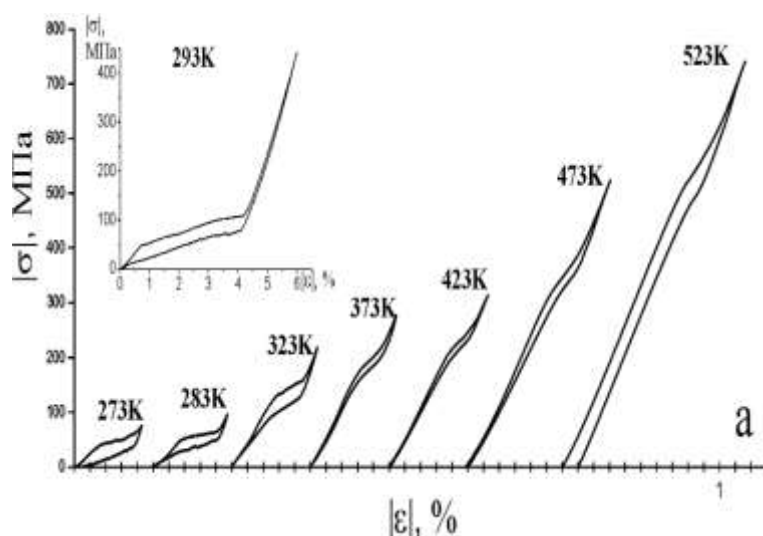


Рис. 2. Дислокационная структура после двух циклов нагрузка-разгрузка при $T = 423$ К в закаленных $[011]$ – монокристаллах.

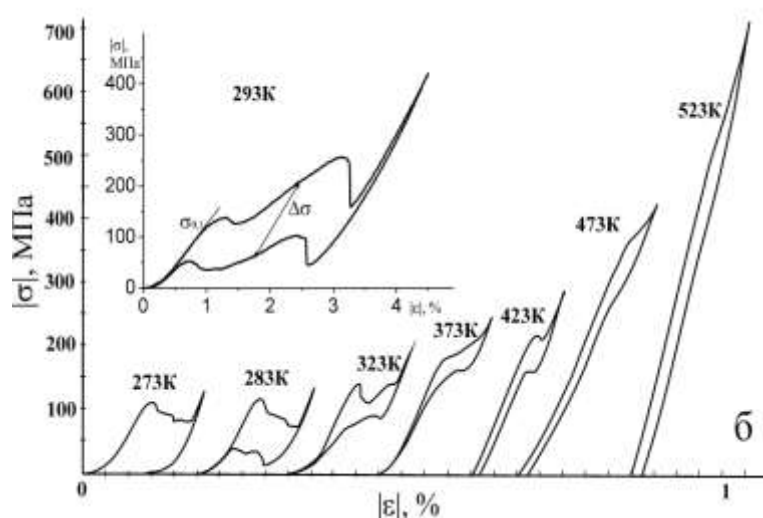


Рис. 1. Кривые «напряжение – деформация» для а- для закаленных $[001]$ и б- $[011]$ монокристаллов $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$ при деформации сжатием в зависимости от температуры испытания в температурном интервале СЭ.

ориентационная зависимость СЭ. При $T = 293$ К закаленные $[001]$ - монокристаллы CoNiAl (рис.1.а) характеризуются низкими критическими напряжениями образования мартенсита $\sigma_{\text{кр.}}(T = 293 \text{ К})$, большой обратимой деформацией $\varepsilon_{\text{СЭ}}$ и узким механическим гистерезисом $\Delta\sigma$ (рис 1 а, б, таб. 1).

В монокристаллах при $T = 293$ К максимальная величина обратимой деформации при реализации СЭ в $[011]$ -кристаллах меньше чем в $[001]$ -кристаллах (таб. 1). В закаленных $[011]$ -монокристаллах при $T > 373$ К полной обратимости заданной деформации не наблюдается. При $T = 423$ К наблюдается деградация петли СЭ с необратимой деформацией

$\varepsilon_{\text{необ.}} = 0,5 \div 0,8 \%$, которая возникает за счет образования дислокаций при B2-L1_0 МП под нагрузкой (рис. 2), тогда как в закаленном состоянии $[001]$ -кристаллов полная обратимость наблюдается вплоть до 473 К. Экспериментально установлено, что старение упрочняет высокотемпературную B2 -фазу,

Таблица 1 – Функциональные свойства монокристаллов $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$				
обработка	Гом. + закалка		Старение без σ	
ориентация	$[001]$	$[011]$	$[001]$	$[011]$
$\varepsilon_{\text{СЭ}} \pm 0,3 \%$	3,6	2,2	2,4	2,0
$\varepsilon_{\text{ЭПФ}} \pm 0,3 \%$	3,9	2,8	-	-
$\Delta\sigma \pm 3 \text{ МПа}$	23	122	51	45
$T_1, \text{ К}$	283	283	223	223
$T_2, \text{ К}$	473	373	523	473
$\sigma_{\text{кр}}(T_{\text{ком}}) \pm 5, \text{ МПа}$	50	117	307	270

снижает температуры МП до $M_s < 175$ К, подавляет дислокационное скольжение при развитии МП под нагрузкой, ослабляет ориентационную зависимость СЭ и значительно расширяет температурный интервал проявления СЭ (рис. 3 б).

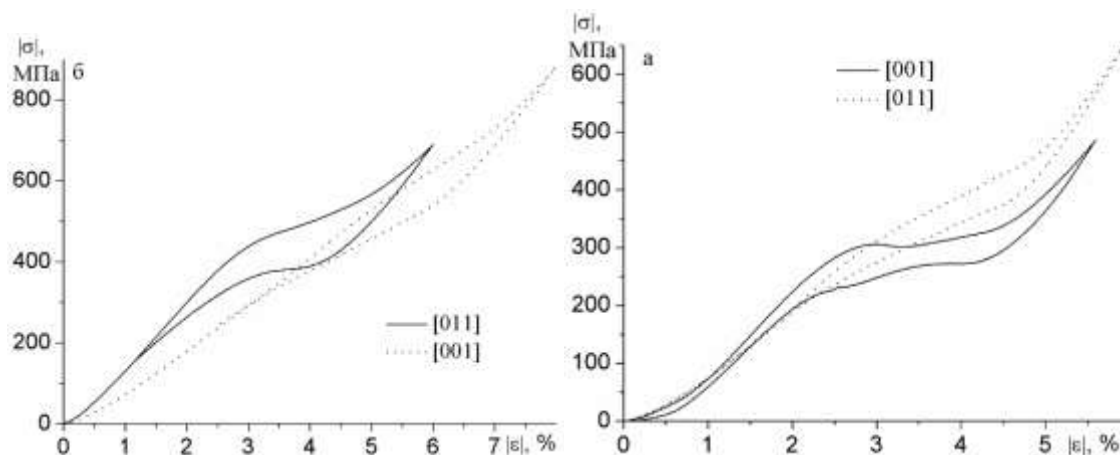


Рис. 3. Ориентационная зависимость петли СЭ при а - $T = 293$ К и б - $T = 423$ К в состаренных монокристаллах $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$, ориентированных вдоль [001] и [011]-направлений.

Старение в свободном состоянии упрочняет высокотемпературную В2-фазу, подавляет дислокационное скольжение при развитии МП под нагрузкой, в результате при $T = 423$ К наблюдается совершенная СЭ. (рис. 3, таб. 1). Из рисунка 3 видно, что при $T = 293$ К критические напряжения образования мартенсита, величина механического гистерезиса $\Delta\sigma$ в состаренных [001] и [011]-направлений одинакова. При $T = 423$ К [001] и [011]-кристаллы проявляют полную СЭ, которая не сопровождается необратимой деформацией, а так же обладают высокой циклической стабильностью при изотермических циклах «нагрузка - разгрузка».

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 12-08-00573.

Список используемой литературы:

1. Dadda, J., Maier, H. J., Karaman, I., Chumlyakov, Y. I. Cyclic deformation and austenite stabilization in $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$ single crystalline high-temperature shape memory alloys // *Acta Mater.* – 2009. V. 57(20). P. 6123-6134.
2. Панченко Е.Ю., Чумляков Ю.И., Маиер Н., Канафьева А.С. Влияние старения в свободном состоянии и под нагрузкой на функциональные свойства [011]-монокристаллов CoNiAl // *ФММ.* – 2011. – №6. С.96-102.
3. Косицын С. В., Валиуллин А. И., Катаева Н. В., Косицына И. И. Исследование микрокристаллических сплавов на основе моноалюминиды никеля с высокотемпературным термоупругим мартенситным превращением. I. Резистометрия сплавов Ni-Al и Ni-Al-X ($X=\text{Co}, \text{Si}, \text{Cr}$) // *ФММ.* – 2006. № 4. С. 418-432.